УДК 681.78

Ю.Ф. Кутаев, Л.И. Тимченко, В.А. Губернаторов, Н.И. Кокряцкая
Государственный экономико-технологический университет транспорта, г. Киев, Украина
pontiw@rambler.ru

Применение метода сечений для контроля формы поверхности пятна излучения в реальном времени

В статье рассматривается проблема контроля формы поверхности пятна излучения в реальном времени. Предлагается использование метода сечений для формирования выборки и последующей обработки дальнейших изображений.

Введение

В настоящее время в полиграфии, лазерной обработке материалов, локации, оптической связи и других областях техники ощущается необходимость более широкого внедрения оптико-электронных систем с автоматической корректировкой искажений формируемого светового излучения. Причинами этих искажений могут быть дестабилизирующее воздействие механических или климатических факторов, нестабильность характеристик источника излучения, возмущения в оптическом тракте, разъюстировка оптических элементов и т.п. Обеспечение приемлемого качества коррекции требует непрерывного динамического контроля характеристик светового излучения, например пространственного распределения его интенсивности, в том числе оценки отклонения указанного распределения от исходного или эталонного распределения.

Целью данной работы является разработка метода выборки и последующей обработки формы поверхности пятна излучения в реальном времени.

Приближенная классифицирующая функция

Традиционный путь решения данной задачи включает формирование изображения пятна излучения $B(x, y)$ на светочувствительной поверхности фотоприемника с последующим преобразованием в сигнал $U(x, y)$, амплитуда которого в каждой точке разложения с координатами (x, y) соответствует интенсивности в $B(x, y)$, т.е. $U(x, y) \leftrightarrow B(x, y)$. Далее сигнал $U(x, y)$ сравнивают с эталонным сигналом $W(x, y)$ для всех точек разложения сигналов. Сигналы $U(x, y)$ и $W(x, y)$ представляют собой некоторые поверхности, которые могут отличаться типом, коэффициентом относительного масштаба, вектором относительной координатной привязки и углами относительных поворотов в трехмерном пространстве. Поэтому сравнение этих поверхностей должно производиться с учетом всех возможных ситуаций, что требует огромного объема вычислений и затруднительно для осуществления в реальном времени.

В практически важных случаях требуемое сравнение поверхностей $U(x, y)$ и $W(x, y)$ может быть реализовано с помощью излагаемого ниже нового метода сечений. Этот метод включает следующие операции:

1) нахождение максимальных амплитуд сигналов *U(x, y)* и *W(x, y)* (рис. 1):

$$U_{\max} = \max U(x,y) = h_u,$$

$$W_{\max} = \max W(x,y) = h_w;$$

2) нахождение значений площадей $S_{0,75u}$ и $S_{0,5u}$ сечений на уровнях 0,75 h_u и 0,5 h_u для сигнала *U(x, y)* соответственно, $S_{0,75w}$ и $S_{0,5w}$ на уровнях 0,75 h_w и 0,5 h_w для сигнала *W(x, y)* соответственно;

3) расчет приближенных значений коэффициентов формы $\tilde{r}_{v,u}$ и $\tilde{r}_{v,w}$ для сигналов *U(x, y)* и *W(x, y)* соответственно;

$$r_{v,u} \approx \tilde{r}_{v,u} = r_{s,u} = S_{0,75u} / S_{0,5u}, \tag{1}$$

$$r_{v,w} \approx \tilde{r}_{v,w} = r_{s,w} = S_{0,75w} / S_{0,5w}, \tag{2}$$

где ~ – знак приближенного значения,

$$r_{v,u} = V_{0,5u} / h_u S_{0,5u},\ 0 < r_{v,u} \le 1, \tag{3}$$

$$r_{v,u} = V_{0,5w} / h_w S_{0,5w},\ 0 < r_{v,w} \le 1, \tag{4}$$

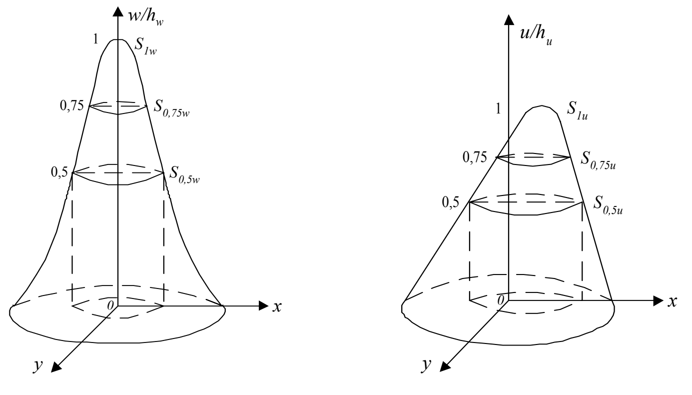
где $V_{0,5u}$ и $V_{0,5w}$ – суммарное значение амплитуд сигналов *U(x, y)* и *W(x, y)*, меньших уровней 0,5 h_u и 0,5 h_w соответственно;

Покажем справедливость $r_v \approx r_s$ на примере текущего сигнала *U(x, y)* следующим образом.

Объем $\widehat{V}_{0,5u}$ фигуры выше сечения поверхности *U(x, y)* по уровню 0,5 h_u может быть найден с помощью одной из известных формул приближенного вычисления интегралов для равноотстоящих узловых точек, например, формулы Симпсона [1, с. 507]:

$$\widehat{V}_{0,5u} \approx h_u \left[S(U_{\max}) + 4S_{0,75u} + S_{0,5u} \right] / 12 \approx h_u S_{0,5u} (4r_{s,u} + 1) / 12. \tag{5}$$

Так как $S(U_{\max}) = S_{1u}$ – площадь сечения поверхности на уровне максимальной амплитуды, при этом чаще всего $S_{1u} \approx 0$.



а) б)

Рисунок 1 – Сигналы эталонного (а) и текущего (б) изображения пятна излучения

4) сравнение коэффициентов формы $r_{s,u}$ и $r_{s,w}$ (вместо поэлементного сравнения поверхностей).

Используя (5), легко получить

$$V_{0,5u} = \widehat{V}_{0,5u} + h_u S_{0,5u} / 2 \approx h_u S_{0,5u} (4r_{s,u} + 7) / 12, \tag{6}$$

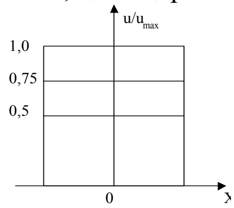
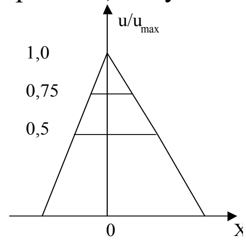
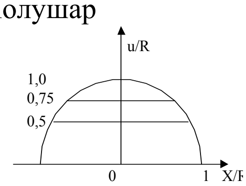
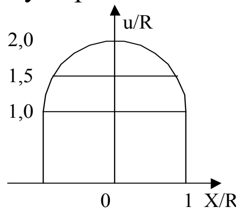
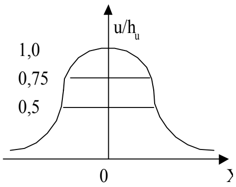
откуда следует

$$\tilde{r}_{v,u} \approx (4r_{s,u} + 7)/12. \qquad (7)$$

Линейная зависимость коэффициентов $\tilde{r}_v$ и r_s позволяет использовать коэффициент r_s как характеристику формы соответствующей поверхности.

Возможности классификации типов поверхностей посредством коэффициента r_s отражены в табл. 1. Разные значения коэффициента r_s соответствуют разным типам поверхностей приведенных в ней примеров фигур.

Таблица 1 – Профиль продольного сечения

Рисунок продольного сечения	Значения коэффициента			Значение погрешности δr_v
	r_s	$\tilde{r}_v$	r_v	
1. Призма, цилиндр 	1	11/12 ≈ 0,92	1	1/12 ≈ 0,083
2. Пирамида, конус 	1/4 = 0,25	2/3 ≈ 0,67	2/3 ≈ 0,67	0
3. Полушар 	7/12 ≈ 0,58	7/9 ≈ 0,78	7/9 ≈ 0,78	0
4. Полушар с основанием 	3/4 = 0,75	5/6 ≈ 0,83	5/6 ≈ 0,83	0
5. Гауссоида $(1/\sqrt{2\pi})\exp\{-(x^2+y^2)/2\}$ 	ln(4/3)/ln2 ≈ 0,415	8,66/12 ≈ 0,722	1/2 ln ≈ 0,721	≈ 0

Важным достоинством коэффициента r_s для некоторых типов поверхностей является его независимость от коэффициента масштаба, сдвига и ориентации соответствующей поверхности. Кроме того, вычисление коэффициента r_s, так как число разрядов кода значения $S_{0,5}$ всегда существенно меньше числа разрядов кода значения $V_{0,5}$.

Коэффициент $4r_s$ характеризует обобщенную выпуклость поверхности: при $4r_s > 1$ – поверхность выпукла, при $4r_s < 1$ – поверхность плоская в обобщенном смысле, при $4r_s = 1$ – поверхность линейна в обобщенном смысле.

Важно отметить, что поверхность можно охарактеризовать площадью эффективного сечения $S_э$:

$$S_э = 2(V_{0,5} - S_{0,5} \times h \times 0,5)/h \approx 2(S_{0,5}\tilde{r}_v h - S_{0,5} \times h \times 0,5)/h = 2S_{0,5}(\tilde{r}_v - 0,5), \qquad (8)$$

откуда

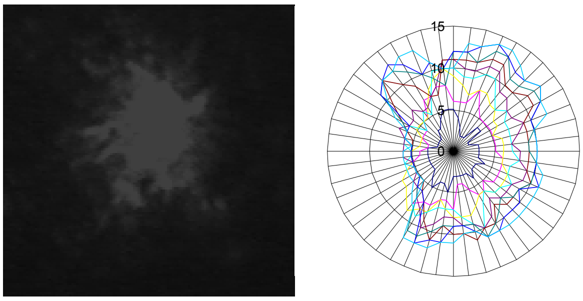
$$S_э \approx \tilde{S}_э = \begin{cases} (4S_{0,75} + S_{0,5})/6 & при\ S_1 \approx 0, \\ (S_1 + 4S_{0,75} + S_{0,5})/6 & при\ S_1 \neq 0, \end{cases} \qquad (9)$$

где S_1 – площадь сечения сигнала на его максимальном уровне.

Метод сечений [2] можно использовать для выборки сигналов лазерных пучков, а в качестве параметра выборки использовать коэффициент формы, при этом данная методика будет использоваться для нахождения центров лазерных пучков.

Алгоритм заключается в следующем:

1. На изображении находится точка с максимальной яркостью.
2. От найденного значения яркости на изображении выбираются 5 значений яркости, каждое на единицу меньшее от предыдущего. Крайние точки каждого из 6 диапазонов образуют краевые линии. В результате получается 6 краевых линий.



а) б)

Рисунок 2 – Форма пятна лазерного пучка
(а – фото с камеры, б – схематический рисунок)

3. Для каждого краевого контура определяется предварительный центр, после чего вычисляется усредненный центр для координат X и Y.

Координаты *(x,y)* энергетического центра двумерного сигнала с удельной нелинейной плотностью *w(f(x,y))*, соответствующей данному значению *f(x,y)*, выражаются в следующем виде:

$$x = \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \times x,\quad y = \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \times y,\quad M = \sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)).$$

4. Полученные краевые линии разбиваются на 4 сегмента. В качестве центральной точки используются координаты предварительного центра (усредненного центра).

5. Определяются «хорошие» и «плохие» изображения по факту попадания в рассчитанный туннель вычисленного коэффициента формы. Если коэффициент формы текущего изображения попадает в туннель, то последнее считается «хорошим», в противном случае – «плохим». Границы туннеля вычисляются в обучаемой выборке изображений путем последовательного выбора изображений и соответствующих коэффициентов формы с минимальным разбросом координат предварительных центров.

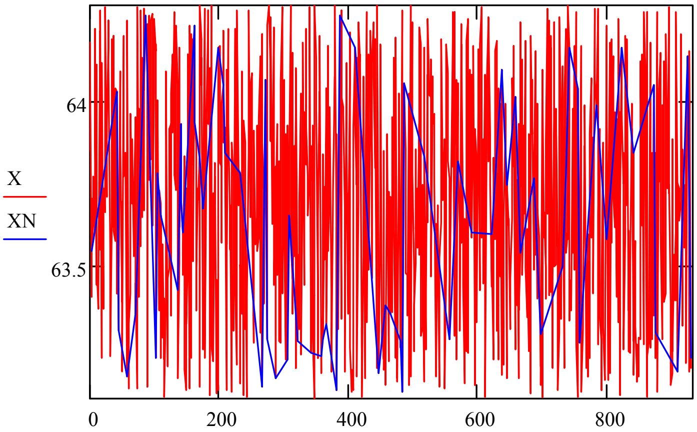
6. Вычисляются координаты энергетических центров только для «хороших» изображений.

Результаты экспериментальных исследований

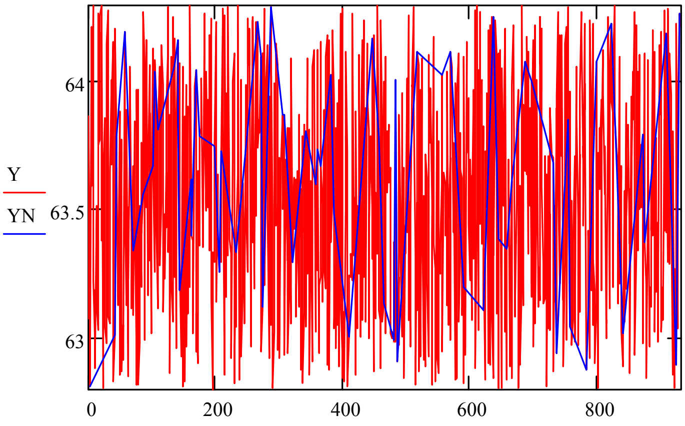
Исследовано 15 трасс лазерных пучков [3] и получены следующие результаты (показано для 2-х трасс):

1. Границы туннеля $\underset{\wedge\wedge\wedge}{a} := 0,777$ $\underset{\wedge\wedge\wedge}{b} := 0,78$.

Значение разницы между максимальным и минимальным значением координат 1,147.



а)

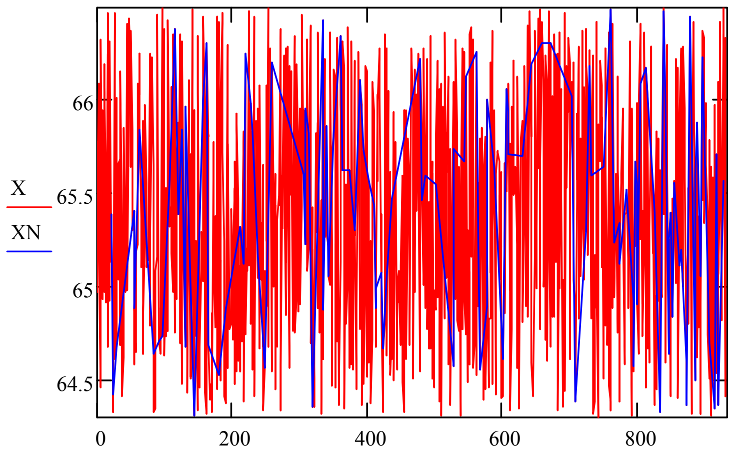


б)

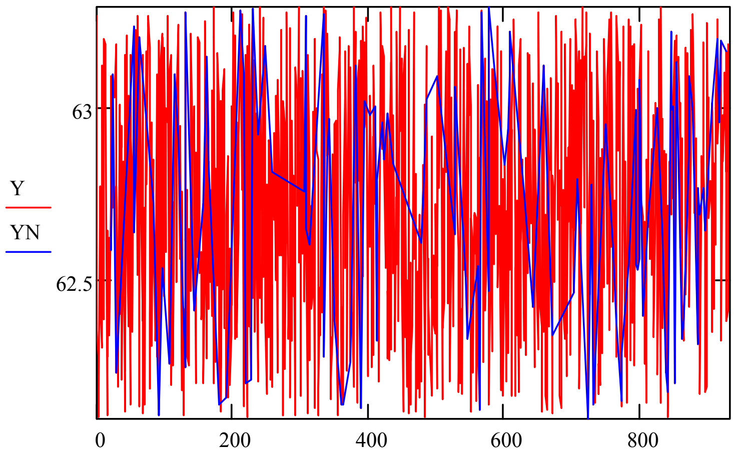
Рисунок 3 – График распределения координат центров лазерных пучков (а) – значение X, б) – значение У), где X, У – координаты всей трассы лазерных пучков соответственно; XN, YN – значения координат центров пятен после выборки

2. Границы туннеля $a := 0{,}751$ $b := 0{,}757$.

Значение разницы между максимальным и минимальным значением координат 2,18.



а)



б)

Рисунок 4 – График распределения координат центров лазерных пучков (а) – значение X, б) – значение У), где X, У – координаты всей трассы лазерных пучков соответственно, XN, YN – значения координат центров пятен после выборки

Выводы

Эксперименты показывают, что для изображений пятен лазерных пучков в результате действия разнообразных дестабилизирующих факторов невозможно точно измерять координаты их энергетических центров, однако точность можно существенно повысить, используя вычисление коэффициента формы изображений с последующей их классификацией на «хорошие» и «плохие». Сравнительный анализ показывает, что предложенные методы позволяют измерять координаты центра лазерных изображений с точностью определения точки привязки не менее чем 1 – 2 элемента разложения, что по точности превышают известные, например, на основе определения центра масс с помощью моментных признаков, в среднем в 1,5 раза.

В соответствии с изложенным методом сечений сравнение поверхностей сводится к сравнению их коэффициентов формы и не требует поэлементного сравнения

с учетом всех случаев отличия их типов, коэффициента масштаба, относительного сдвига и поворота в пространстве. Важно отметить, что равенство коэффициентов формы поверхностей, в общем случае, позволяет отнести их к одному и тому же обобщенному типу поверхности или аппроксимировать этим типом поверхности.

Очевидно, что метод сечений может быть легко распространен на случай увеличения числа равноотстоящих сечений поверхности или изменения значений уровней сечений, изменения весовых коэффициентов площадей сечений.

При этом в качестве порождающей основы также целесообразно использовать подходящую формулу приближенного вычисления интегралов [1].

Рассмотренный метод сечений перспективен также для применения в задачах классификации и архивации изображений в реальном времени. Важным достоинством данного метода является простота осуществления как программными, так и аппаратными средствами.

Литература

1. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1986.
2. Кутаев Ю.Ф. Метод фильтрации геометрического шума бинарного изображения / Ю.Ф. Кутаев, А.С. Сидоров // Сб. научных трудов «Информационная и микропроцессорная техника в полиграфии». – М. : Изд-во МПИ «Мир книги», 1992. – С. 57-73.
3. Laser Control of Near Earth Space and Possbilities for Removal of Space Debris from Orbit with Explosive Photo-Dissociation Lasers with Phase Conjugation / N.G. Basov, E.M. Zemskov, Y.F. Kutaev [et. al.] // Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symposium, (St-Petersburg, (Russia 1998)).
4. Тимченко Л.И. Система координатной привязки для нестационарных сигналов / Л.И. Тимченко, Ю.Ф. Кутаев, А.А. Герций // Известия РАН. – 2001. – № 6. – (Серия физ.). – С. 886-890.
5. Timchenko L.I. Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images / Leonid I. Timchenko, Yuriy F. Kutaev // Proceedings of SPIE. – Vol. 4790. – 2002. – P. 465-479.

Кутаєв Ю.Ф., Тимченко Л.І., Губернаторов В.А., Кокряцька Н.І.

Застосування методу перетинів для контролю форми поверхні плями випромінювання у реальному часі

У статті розглядається проблема контролю форми поверхні плями випромінювання у реальному часі. Пропонується використання методу перетинів для формування вибірки і подальшої обробки подальших зображень.

Kutaev Y.F., Tumchenko L.I., Gubernatorov V.A., Kokryaytskaya N.I.

Application of the Method of Sections for the Control of the Form of the Surface of the Stain of Radiation in Real Time

In the article the problem of control of form of surface of spot of radiation is examined in real time. The use of method of sections is offered for forming of selection and subsequent processing of further images.

Статья поступила в редакцию 02.07.2010.